

产业链韧性测度方法研究进展*

肖兴志 王振宇 李少林

摘要:产业链韧性测度是识别“断链”风险和维护产业链安全稳定的现实抓手,成为新时代应对、把握和引领大变局亟待解决的热点问题。本文在分析产业链韧性测度现实需求的基础上,从产业链韧性测度的理论基础、方法类型、应用步骤三个方面就经典文献进行述评。首先,围绕恢复、抵抗、适应与变革四大能力追溯概念界定、内涵特征和学科交叉的理论起源;其次,系统梳理了以核心变量法、综合评价法及投入产出法为代表的产业链韧性评价方法,剖析了各自优点与相对不足;最后,全面厘清了“冲击识别—结构分析—韧性评价”框架下的韧性测度理论与方法应用。本文认为,产业链韧性测度方法的选取及应用须高度重视学科交叉的应用场景,廓清理论模型的适用条件,为测度和增强产业链韧性提供多样化、稳健性的方法支撑。

关键词:产业链韧性 经济韧性 测度方法

一、引言

当前,百年变局愈演愈烈,地缘政治形势复杂多变,全球经济不确定性增加,经济竞争由产业竞争演变为产业链竞争,技术“卡脖”与产业“断链”成为威胁产业安全的主要因素。党的二十大报告强调,要“着力提升产业链供应链韧性和安全水平”。锻铸产业链韧性、维护产业链安全成为构建新发展格局、实现中国经济高质量发展的迫切要求,成为推进中国式现代化进程亟待解决的时代任务。

锻铸产业链韧性来自维护产业安全的现实需求。在贸易保护主义抬头、产业“脱钩”风险上升的现实背景之下,国家的产业安全水平受到严峻挑战。以往文献中不乏对于产业安全的探讨,业已涉及农业产业安全、装备制造业安全、金融投资业安全、航运物流业安全、信息技术产业安全等多个领域(Christensen, 2011; Klimek et al., 2015; Smith, 2015; Huang et al., 2017; Nassar et al., 2020)。然而,这些研究多基于微观产业数据与静态视角,通过截面分析、网络分析等方法对产业的安全水平进行总体评价,缺乏对产业链条风险抵御、恢复水平以及代偿能力的动态考察。产业链韧性作为衡量产业安全水平的重要指标,能够对产业的风险应对过程进行直观量化,提升产业链韧性正成为维护产业安全发展的题中之义。早期的产业链韧性研究多承袭经济韧性的研究方法,从宏观层面选取代表性指标或者构建指标体系来表征韧性水平(Martin, 2012; Lagravinese, 2015),但是这一方法并不能反映产业链的网络结构,也无从刻画产业链节点的形态特征。在产业链韧性研究中,亟须新的韧性测度方法,对产业链韧性进行合理、科学的测度。

就目前的产业链韧性研究而言,仍存在两大亟待突破的难点问题:其一,产业链概念界定模糊且尚未达成共识。产业链、供应链、价值链是三个相异的概念,但是三者统一于生产销售所形成的循环流通体系之中,且渐成融合趋势(Hu & Zhang, 2023)。其二,产业链韧性测度方法迥异且缺乏可比性。虽然已有文献中的韧性测度各具实证基础,但是背景不同,方法各异,从而所得结论难以横向比

* 肖兴志、王振宇、李少林,东北财经大学产业组织与企业组织研究中心,邮政编码:116025,电子邮箱:wangzhenyudlu@163.com。基金项目:国家社会科学基金重大项目(23&ZD048);国家自然科学基金面上项目(71873025)。感谢匿名审稿人的建设性意见,文责自负。

较(Barrett et al., 2021)。本文聚焦于产业链韧性理论内涵与测度方法的新进展,对产业链韧性测度理论的经典文献进行梳理和评价,分别介绍了核心变量法、综合评价法以及投入产出法三类产业链韧性测度方法,并基于学科交叉视角将相关学科的韧性理论归纳于“冲击识别—结构分析—韧性评价”的三维韧性框架之中,对产业链韧性的测度方法进行了拓展与补充,以期为后续的产业链韧性研究提供方法上的启示。

二、产业链韧性测度的理论基础

厘清产业链韧性的概念是科学测度产业链韧性的理论前提。产业链韧性由“产业链”和“韧性”两部分组成,前者作为产业经济学概念,业已得到学者的广泛关注;后者作为物理学与工程学概念,逐步演进到生态学、心理学、管理学以及经济学之中,业已成为具有多重含义的跨学科名词(Hynes et al., 2022)。产业链韧性作为“产业链”与“韧性”的有机嫁接,在承袭两者的理论内涵的同时,又衍生出依赖于外生冲击情景的特殊内涵。

(一)产业链理论的内涵与辨析

产业链在含义上有“狭义”与“广义”之分,在形态上有“链条”与“网络”之别,同时可以反映产业发展的动态特征,反映不同产业的经济安全状况,故在进行产业链韧性的研究之前,有必要厘清产业链的概念与内涵。

1. 产业链的概念界定

产业链的思想起源于亚当·斯密的产业分工理论,但西方学者长久以来并未将其作为一个独立的经济概念进行系统的研究(Lin & Teng, 2023)。在社会经济活动中,由于生产分工的存在,国民经济的各个产业部门之间形成了一种相互关联的链状结构。尽管随着生产环节不断增加,经济活动不断拓展,各个单一链条逐渐联系而形成相互交叠的网络结构,但是产业链中不同产业间相互关联的本质没有改变,产业链这一称谓沿用至今。随着研究不断深入,部分学者将产业链与供应链、价值链概念相融合,因此使得产业链成为一个包含产品生产、商品流通以及价值增值的广义概念(McNerney et al., 2013, 2022)。随着产业链内涵的不断丰富,产业链类型逐步多样化,其动态特征也不断显现。

2. 产业链、供应链、价值链的联系与区别

广义产业链包含着产品的价值增值路径与生产流通关系,研究产业链问题也必然要考虑价值链、供应链的形态特征与影响。Oliver & Webber(1982)提出供应链管理概念,供应链的研究视角比产业链更为微观,其研究范围也更为特定和局部。供应链研究主要关注提高生产效率、降低库存成本、减少运输时间等方面,以确保产品能够高效流通,为市场提供持续的物质流动(Carter et al., 2015)。Porter(1985)提出价值链理论,并将价值链加入竞争策略的研究中,完善了企业管理理论。价值链理论基于生产过程观,将生产系统视为投入产出过程,在此过程中的生产转换方式影响成本与利润。在投入产出过程中,产业链节点的各个生产者对中间产品进行价值赋值,由此价值依托于中间产品进行传递,其增值路径逐渐生成价值链(Porter, 1985)。各个公司的价值链组合成为价值体系,成为企业战略决策的重要依据。随着经济全球化与跨国公司出现,价值链的概念拓展至全球范畴。Gereffi(1994)提出“全球商品链”(global commodity chain, GCC)概念,随后这一概念逐步演变为“全球价值链”(global value chain, GVC)概念。全球价值链的兴起,极大地改变了全球的生产格局和贸易本质,加速了“链竞争”时代的到来。综上所述,产业链、供应链与价值链三者研究重点不同,各有侧重,但三者“由链及网”的发展特点使其相互交织成为一个复杂网络系统,共同影响着产业链供应链的稳定与安全。

(二)韧性理论的溯源与演进

韧性在物理学、心理学、生态学、管理学与经济学等学科中的含义具有差异性,部分学者因其属于“模糊概念”(fuzzy concept)而对韧性研究保持犹豫态度(Pendall et al., 2010)。在百年未有之大变局下,如何提高经济系统韧性已经成为经济研究的重点问题,社会科学中韧性理论的含义与分析框架也在众多学者的推动下逐步明朗。

1. 韧性理论之溯源

韧性理论起源于物理、工程以及材料科学领域,并逐步运用于生态学、心理学以及经济学中,业已形成一套多属性、多含义、多方法的理论体系。首先要明确的是,物理学中的韧性(toughness)同经济学中的韧性(resilience)并非同属一词,物理学中的“弹性”对应于英文“resilience”。具体而言,当对固体材料施加外部载荷时,它往往会产生暂时的弹性形变或永久性的塑性形变。固体材料在弹性形变时可以吸收的最大能量称为弹性,而其在塑性形变时可以吸收的最大能量称为韧性。值得一提的是,在社会科学研究中,部分学者也将英文“resilience”译作“弹性”,实则与本文所指“韧性”同义。其次,生态韧性是指生态系统面临冲击作用下,在稳定状态转变的临界点(阈值)所能吸收的最大冲击与恢复能力(Meyer et al., 2018)。生态韧性试图刻画生态系统遭遇人为或自然因素冲击之时的抵抗与恢复力,其核心在于多重平衡、阈值思想以及反馈机制。社会生态系统相关变量一旦超过对应阈值,就会导致系统反馈的改变,从而导致生态结构与系统功能发生变化(Olsson et al., 2015)。

由于生态学韧性研究中经常涉及关于区域经济复苏的研究,部分学者尝试将此作为重点进行研究,由此产生经济韧性(economic resilience)的概念(Farber, 1995)。起初,经济韧性承袭工程学与生态学两大基本观点,表征经济系统对于冲击的抵抗能力与冲击之后的恢复能力(Briguglio et al., 2009)。在2008年金融危机之后,如何恢复经济发展水平成为经济学研究的重要课题,经济韧性理论也得到了新的发展。

2. 韧性理论之演进

韧性是一个动态的“过程”而非静止的状态(Rose, 2007), Martin & Sunley(2015)将区域经济韧性定义为地区经济承受市场、竞争和环境冲击并且进行恢复的过程。在必要时,遭受冲击的地区可通过对其经济结构、社会和制度安排进行变革,以维持原有的发展状态,或过渡到以更充分和更有效地利用其物质、人力和环境资源为特征的新的可持续发展道路。同时, Martin & Sunley(2015)提出了区域韧性过程的四维框架,即脆弱性(vulnerability)、抵抗力(resistance)、恢复力(recovery)、稳健性(robustness)。脆弱性是一个地区的企业和工人对不同类型冲击的敏感性,抵抗力指冲击对地区经济的初始影响,稳健性反映该地区的企业、工人和机构如何调整 and 适应冲击,而恢复力指恢复的程度与性质。Grafton et al. (2019)将后三者定义为“3R指标”,并认定其为韧性管理决策过程中的重要标准。

韧性问题存在均衡分析(equilibrium analysis)与复杂适应性系统分析(complex adaptive systems analysis)两种分析框架(Pendall et al., 2010),无论是工程学韧性倡导的“单一均衡”还是生态学韧性倡导的“多重均衡”,都遵循均衡思想,但是社会系统常常处于非均衡状态,呈现出复杂的动态特征。对此,部分学者尝试利用动态观点评价韧性水平,先后提出适应性韧性(演化韧性)与变革性韧性(Simmie & Martin, 2010)。同 Martin & Sunley(2015)的韧性思想一致, McCarthy et al. (2017)从过程视角审视韧性概念,提出扰动之后的系统变动是一个对系统内个体变换、选择与保留的再组织过程。这一再组织过程具有演进特征,因而称之为适应性韧性(adaptive resilience)或演化韧性(evolutionary resilience)。然而, Anguelovski et al. (2016)提出系统在不断适应冲击、循环演进的过程中经常出现利益不一致问题,基于韧性目标出发进行的管理决策可能存在帕累托改进,由此产生“为谁而适应”的问题。为此,部分学者重新思考社会的多维度问题以及原有韧性理论的局限性,借此提出变革性韧性(transformative resilience)。同适应性韧性预防和应对冲击的中短期调整行为不同,变革性韧性提倡从长期角度出发,以创新方法重新整合系统内部结构,打破并创造新的发展路径(Bănică et al., 2020; Asadzadeh et al., 2022)。工程韧性、生态韧性、适应性韧性与变革性韧性四种韧性观点与方法统一于经济韧性之中,相互补充,使得经济韧性理论日臻完善(Sutton & Arku, 2022)。

(三) 产业链韧性的理论内涵

产业链韧性一词由产业链与韧性嫁接而成,在承袭经济韧性分析方法的同时,又具备产业链韧性的独特内涵。本文通过文献梳理发现,部分研究对于产业链韧性内涵的界定承袭了 Martin(2012)关于区域韧性的四维框架,包含抵御能力、恢复能力、再组织能力、更新能力四种基本内涵。而借鉴

Martin & Sunley(2020)、Asadzadeh et al.(2022)等韧性理论的更新框架,产业链韧性应至少包含抵抗能力、恢复能力、适应能力与变革能力四层含义。

首先,产业链的抵抗能力体现为冲击发生时产业链的完整性状况,因为产业链具备网络结构,可以通过分析产业链节点(弧)拓扑特征的变动来判断产业链抵抗能力的强弱(McNerney et al.,2013;Xu et al.,2019)。同时,产业链的绩效表现同样可以反映其抵御冲击的能力,如行业就业人数变动(Di Tommaso et al.,2023)、企业生存状况(Behrens et al.,2020)以及产业链中供应商中断比例(Khanna et al.,2022)等。其次,产业链的恢复能力,包含恢复时间与恢复质量两部分,恢复时间体现了产业链恢复的速度与活力,而通过比较冲击前后产业链的绩效指标可以评估产业链韧性的恢复质量。再次,产业链的适应能力体现为在现有技术水平上对产业链条连接方式与生产环节的改善与优化,体现了产业链的局部调整能力。最后,产业链的变革能力涉及产业链中的重大技术革新、制度与组织设计革新以及发展路径再选择、产业基础再造、产业安全等诸多问题。例如,在产业链的制度设计层面,Gong et al.(2022)对浙江省系统化推行的产业链“链长制”建设予以介绍。“链长”主体在政府,“链主”主体在企业,两者协调配合,统筹内外部资源,集中力量在产业链薄弱环节进行重点突破,加速构建完整产业链条。该举措提高了受冲击时期的产业链韧性,为深入融合全球生产网络的地区提升产业链韧性提供了实践经验。

然而,产业链韧性并不等同于经济韧性,学者在借鉴经济韧性研究的同时,应当注意到产业链韧性研究的特殊性。这类特殊性体现在:第一,相较于经济韧性,产业链韧性的研究视角更为微观。现有的经济韧性研究多基于区域经济发展的视角展开讨论,而产业链韧性基于产业视角,从特定行业内的生产活动、技术水平、组织稳定性等方面进行考量,常常与供应链韧性(supply chain resilience)、组织韧性(organizational resilience)等微观领域的韧性研究相联系,并且渐具融合趋势(Grossman et al.,2023;Yu & Chen,2023)。第二,相较于经济韧性,产业链韧性更加注重“代偿”能力。“代偿”一词多见于医学研究领域,指器官或者肌肉能够调整其功能和力量,以弥补受损部位的功能缺失,属于身体机能的一种自适应机制(van der Kruk et al.,2021)。对于产业链韧性研究而言,在外生冲击致使某个节点断裂的情形之下,代偿机制能否发挥作用、产业链能否在较短时间内恢复畅通是检验产业链韧性水平的关键。第三,相较于经济韧性,产业链韧性更加重视不同节点的连接属性与网络特征。大量的产业链、供应链相关研究也正是基于这一角度,利用投入产出模型、网络分析或者复杂系统科学方法捕捉产业链节点的属性,进而展开深入研究(Reisch et al.,2022;McNerney et al.,2022;Lin & Teng,2023)。

三、产业链韧性测度方法

产业链韧性发轫于经济韧性,承袭经济韧性的研究方法,重点研究产业链在遭受外生冲击或内部扰动情形下的抵抗能力、恢复能力、演化能力与变革能力。本部分结合目前产业链韧性测度的主要研究成果,以核心变量法、综合评价法和投入产出法三类测度方法为主线,总结产业链韧性测度方法的前沿进展与关键问题。

(一)核心变量法

核心变量法是经济韧性研究中常见的测度方法,该方法通过选取单一的代表性变量构建相对变动率指标来捕捉韧性的动态特征,例如Davies(2011)提出使用地区失业率变动来衡量经济韧性水平,Giannakis & Mamuneas(2022)利用劳均产出水平变动衡量区域韧性水平,Jiang et al.(2023)利用股票收益率衡量公司韧性水平等。部分产业链研究学者基于这一思想,将核心变量法运用于产业链韧性的评估之中。

1.核心变量法应用

就方法而言,目前学界利用核心变量法进行韧性测度的研究基本沿用Rose(2007)与Martin(2012)的思路,并在此基础之上加以完善。Rose(2007)较早提出了利用经济产出变动的相对偏离程度衡量韧性水平,Martin(2012)在此基础之上将基于份额偏离思想的核心变量方法加以完善,提出

使用局部变动率与整体变动率的比值表征韧性水平,并将该比值命名为“灵敏度指数”(sensitivity index),Lagravinese(2015)、Martin et al.(2016)对此加以改进,使韧性测度指标更能反映个体之间韧性的异质性。He et al.(2021)提出了基于Lagravinese(2015)韧性测度的简化算法,在不改变测度数值的情况下简化了计算程序。尽管后续学者基于该思想提出了多种韧性测度方法,但总体而言,Lagravinese(2015)、Martin et al.(2016)等框架下的核心变量方法具体可以分成三步:选择代表性指标;进行反事实计算;构建相对灵敏度指数。

在应用层面,Uddin et al.(2022)利用欧盟国家消费品行业经营数据,基于销量、库存、成本等指标相对变动比率构建行业灵敏度指标,对脱欧背景下的英国及其他欧盟国家消费品行业的产业链韧性水平予以测度。Di Tommaso et al.(2023)将“产业韧性”(industry resilience)概念化,并利用美国劳工部劳工统计局(Department of Labor Bureau of Labor Statistics)就业数据,通过构建就业人数的相对变动指标,从抵抗能力与恢复能力角度测度了不同产业的韧性水平。Behrens et al.(2020)指出产业韧性的本质在于企业的生存问题,该文将加拿大服装纺织业的产业链韧性作为研究对象,借助企业的进入退出规模区分企业的生存状态,进而计算冲击之下的企业生存概率,并利用线性概率模型实证研究了企业的地理集聚对于自身韧性水平的影响。Khanna et al.(2022)基于疫情期间印度各地区封锁规模不一致的准自然实验情景,利用事件研究法探讨了封锁政策对于产业链韧性的影响。该文基于印度税务机关的企业级日度交易数据,利用纳税人识别号、邮政编码以及电子运输单追踪产业链条的上下游关系,进而通过测度同一企业在不同时点的供应商进入或退出情况识别供应商中断比率,以此衡量企业的冲击抵御能力与恢复能力。

2. 核心变量法评价

核心变量法的突出优点在于计算相对便捷,具备灵活性与可操作性,但是该方法同样具有较为明显的不足:其一,代表性指标只能从单一维度分析韧性水平,由于经济系统的复杂性,单一指标体系往往不能够全面反映经济韧性或产业链韧性的动态特征。其二,变量的反事实估计存在一定难度,并且反事实指标构建方法的合理性有待考量。现有韧性测度文献中对于反事实估计大致有三类处理方式:第一,利用公开的预期值、冲击发生前的平均值抑或总体水平进行计算,该方法对于代表性变量为GDP的情形尤为适用(Hu et al.,2022)。如Di Tommaso et al.(2023)在假定经济处于稳态的条件下,通过计算冲击时点之前的综合增长率进而计算反事实的就业水平,He et al.(2021)通过国家层面的变动率计算得出城市层面的变动水平,以此作为反事实变动水平。文章中反事实指标构建方法的核心假设为各个部分的反事实变动率同质,然而稳态增长的条件并不总是成立的,尤其对于具体的、微观的产业链而言。第二,通过估计结构参数进行反事实计算,如Doran & Fingleton(2018)参照静态凡登定律(Static Verdoorn Law),设立了美国都市统计区(Metropolitan Statistical Areas)就业水平变动模型,利用GMM-SL-SAR-RE方法(Baltagi et al.,2014)识别结构参数,反事实模拟了2008年金融危机冲击后的就业水平,进而对城市经济韧性予以估算。该文在反事实计算过程中参照了Martin et al.(2016)地区的产出增长率同质性假设,利用全国GDP增长率估计出反事实产出水平。第三,通过网络节点的随机中断模拟外生冲击,进而估计出复杂网络或系统的反事实韧性水平,多见于利用网络分析或复杂系统建模方法进行韧性测度的研究之中(Kim et al.,2015;Xu et al.,2019;König et al.,2022)。

(二)综合评价法

综合评价法是对复杂系统的多个指标进行总体评价方法的统称,该方法借助多准则决策分析(Multi-criteria decision-making,MCMD)工具处理与评价复杂决策问题,在韧性理论的相关研究中已经得到广泛运用(Briguglio et al.,2009;Bolson et al.,2022)。该方法因指标维度分类、指标选取以及权重分配等特征不同而产生多种方法,其中按照权重确定方法的不同可以分成两类:一类是主观赋权法,多数采取综合咨询评分确定权重,如综合指数法、模糊综合评判法、层次分析法、功效系数法等。另一类是客观赋权法,根据各指标间相关关系或各指标值变异程度来确定权数,如主成分分析法、因子分析法、TOPSIS、页面排序法等。

1. 指标维度与赋权方法

在运用综合评价方法测度产业链韧性之前,有两个问题值得研究者考虑,即指标维度与赋权方法。就韧性指标维度而言,尽管目前学界尚无公认的产业链韧性指标体系,但是学者围绕产业链抵抗能力、恢复能力、适应能力等不同维度进行了有益的探讨。联合国粮农组织在官方层面制定了RIMA指标体系,用以衡量发展中国家农业产业链的发展韧性,并通过贫困分析技术网络(THINK-PA)研究农村家庭和弱势群体,就政策和干预措施提供证据和建议,以加强政府参与以及提升农业粮食体系在转型中的韧性、包容性和影响力(Upton et al.,2022)。就韧性指标赋权方法而言,目前产业链韧性测度的综合评价多采用客观赋权方法,主要涉及熵权法、TOPSIS、灰色关联法以及页面排序法(PageRank)等。优劣解距离法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)由Hwang et al.(1993)提出,是多准则决策方法中常见的决策方法,其通过构造评价问题的正理想解和负理想解,比较对应指标同虚拟解的距离来对各评价对象进行排序。所谓正理想解是一个虚拟的最佳对象,其中每个指标值都是所有评价对象中对应指标的最优值,负理想解则反之。同TOPSIS密切相关的方法是灰色关联分析(grey relational analysis, GRA),该方法通过计算各目标方案同理想解的灰色关联系数,进而得到各对象的灰色关联度,关联度越大其评价结果越好。在应用方面,Hu & Zhang (2023)基于协同理论(synergy theory)构建了一个涵盖产业链、创新链、服务链的复合系统协同模型(composite system synergy model),并基于此设计了一个包含6个一级指标和13个二级细分指标的产业链整合体系,对产业发展的技术水平、创新成果转化、资源配置能力等特征进行综合评价。此外,PageRank方法作为一种经典的综合评价方法,在产业链研究领域亦有所体现。PageRank原本为网页排序的关键技术,表征网络页面的重要性水平依赖于其链接页面的数量与质量水平。在产业链研究中,链条节点的重要性可以表述为指向该点的其他节点重要性的加权组合,这与PageRank方法的核心内涵不谋而合。Klimek et al.(2015)基于美国地质调查局(USGS)在矿产商品摘要中提供的71种非燃料矿产资源目录,构建了关键矿产的全球产业链风险网络模型,并借助PageRank方法度量了产业链中各个国家节点的综合风险水平,为产业链韧性研究提供了有益的借鉴。

2. 对综合评价法的评价

综合评价方法通过选取多维度指标进行组合,既实现了数据降维,又保留了原始的多维度信息,能够反映产业链韧性丰富的经济内涵,兼具应用性、系统性、拓展性与灵活性等多重优点(Huang et al.,2023)。但是,已有产业链韧性研究中的综合评价方法仍存在不足:第一,尽管综合指标法可以反映产业链韧性的多维度特征,但该方法在指标选择方面具有主观特点,这可能会导致部分指标选取缺乏权威性。第二,不同的评价方法依据的赋权算法不同,指标体系不同,由此导致评价结果难以进行横向比较,增加了产业链韧性测度的不确定性。第三,缺乏产业链的冲击内涵。产业链韧性源于外生冲击,是一个涉及抵御、恢复、更新以及变革的过程性概念,具有动态特征。而综合评价方法更倾向于宏观层面静态水平的描述,对于微观层面各个节点的抵御、反应能力等动态特征的刻画有所欠缺。第四,在经验研究之中,复杂的指标体系更容易带来难以克服的内生性问题。

(三)投入产出法

近年来随着各个行业、各个经济体之间投入产出数据的不断完善,投入产出分析方法也为韧性分析提供了新的路径。投入产出模型的特点在于研究者可通过数据跟踪经济流动,进而能够分析部门间、区域间的经济依赖关系。这一特点使其得到供应链、价值链以及生产网络研究学者的深入关注,并被逐步拓展到产业链的分析之中。

1. 投入产出法应用

外生冲击以及冲击之后的风险传播深刻影响着产业链的韧性水平,Acemoglu et al.(2012)探讨了微观冲击对于宏观经济的重要影响与风险传播机制,揭示出生产网络拓扑结构对风险传播的影响,这一结论为基于投入产出结构的韧性评价方法提供了理论支持。投入产出分析能够以“产业关联”视角分析不同产业之间的前向联系与后向联系,以此刻画经济增长与波动(McNerney et al.,

2022; König et al., 2022)。Xu et al. (2011)较早地运用投入产出方法测度经济韧性,文章通过不同产业部门之间的价值流动关系合成相对指标,并赋予其韧性含义。Diodato & Weterings (2015)将投入产出框架同劳动力动态相联系,并利用荷兰投入产出数据对韧性的根植性(embeddedness)程度进行评价。该文将根植性定义为区域内各种经济活动通过供需关系相互联系的程度,主要对冲击之后的风险传播力度产生影响。Giannakis & Bruggeman (2017)将偏离一份额分析(shift-share analysis)与投入产出分析相结合,对经济危机期间希腊的区域韧性进行评价。文章对于韧性水平的界定方法同Diodato & Weterings (2015)相一致,若经济危机期间区域就业人数下降幅度低于全国水平,则认定该区域具有韧性。Klimek et al. (2019)将线性响应理论(linear response theory)运用于投入产出模型,开发了一个具有预测能力的韧性分析框架,并利用世界投入产出数据库(World Input-Output Database, WIOD)测度行业敏感性,以此表征产业韧性水平与国家经济韧性。该框架考虑了外生政策冲击对于产业水平的影响,却无法刻画价格的动态特征,而事实上,价格调整是市场主体在应对外生冲击时的一条重要途径。Han & Goetz (2019)利用区域就业的时间序列数据构造出经济韧性指标,并基于美国投入产出数据分别构造了行业以及县级层面的产业中心度指标,进而探讨经济危机期间产业韧性与投入产出结构的相关关系。He et al. (2017, 2019)基于投入产出数据对能源韧性进行了系统分析,He et al. (2019)通过构建多区域投入产出线性规划模型,从“压力测试”的角度定义韧性指标,实证分析了能源生产中断的系统性影响。Lin & Teng (2022)利用中国制造业行业投入产出数据,基于产业关联视角,结合结构路径分析(structural path analysis, SPA)方法验证了产业链结构是影响制造业经济与碳排放脱钩的重要因素。Lin & Teng (2023)基于产业链视角,利用中国非竞争性投入产出数据与SPA方法分析了产业链结构优化对能源消耗强度的影响,证明了产业协同与分工能够显著降低能源消耗强度,对能源依赖度高的部门效果更为明显。

2. 投入产出法评价

利用投入产出模型研究产业链韧性的突出优点在于其能够准确反映不同生产环节、不同行业之间的产业关联状态与价值流动关系,能够对产业链的“链属性”进行精准刻画。然而,就产业链韧性研究而言,投入产出模型并非尽善尽美,同样具有诸多不足。其一,投入产出模型是均衡视角下的线性建模,而韧性分析更加重视灵活性的、非均衡性的冲击与反应(Rose & Krausmann, 2013)。其二,投入产出数据颗粒度往往局限于国家、部门(行业)之间,在企业层级的产业链韧性分析中稍显逊色(Diem et al., 2022)。Gabaix (2011)基于“颗粒假说”(granular hypothesis)指出,当企业规模分布呈现厚尾特征时,个别企业产生的特异性变动将会对总体变动产生重要影响。在风险冲击背景之下,产业链关键节点企业的韧性水平可能在产业链总体韧性水平中发挥重要作用,这对于产业链韧性研究尤为关键。基于此,后续学者利用颗粒度更细的产业链供应链数据对生产网络进行建模,对企业层级网络节点的风险程度进行了科学度量,为测度产业链中微观节点的韧性水平提供了新的借鉴(Dhyne et al., 2021; Diem et al., 2022; Reisch et al., 2022)。与此同时,近年来投入产出分析作为一门独立的学科,理论体系逐渐完备,建模方法不断优化,投入产出数据也处于不断更新之中。Galbusera & Giannopoulos (2018)对投入产出模型与风险评估相关文献进行了系统梳理,详细阐释了基于投入产出模型进行产业链韧性评估的应用场景与方法,国内也有学者从生产网络、价值增值、贸易依存、产业关联、产业链价值嵌入等角度出发,利用投入产出数据研究产业链与产业发展问题,这些工作均为产业链韧性评价研究做出了有益的探讨。

四、学科交叉视域下的产业链韧性框架与拓展

尽管产业链韧性研究起步较晚,相关测度理论尚未成熟,但是经济韧性、供应链韧性以及复杂系统韧性等相关韧性理论发展迅速,其韧性测度与分析的经典框架和前沿方法均具备一定的迁移性。本部分在学科交叉视域之下,总结分析已有韧性理论的相关文献,并将其统一于“冲击识别—结构分析—韧性评价”的分析框架之中,以期通过学科交叉视角探索可供产业链韧性研究借鉴的新方法。

(一)冲击识别

冲击识别是韧性分析的第一步,主要包括关于冲击类型的讨论与冲击时点的识别。对于前者而言,选取何种冲击因韧性分析的对象而异,不同类型的冲击对于系统的影响也不尽相同;对于后者而言,科学识别冲击发生的时点是进行韧性评价的前提。

1. 冲击类型的讨论

产业链韧性理论源于风险控制与管理,关乎系统在风险来临之时的抵抗能力与风险过后的恢复、适应、变革能力,而冲击的类型关乎风险的性质与程度,决定了韧性分析的基本环境与具体方向。总体而言,冲击的类型可以分为自然因素与社会因素两类,在区域韧性的相关研究中,常常将自然灾害视为外生冲击,如洪水(Zhu et al., 2021)、矿难(Gnutzmann et al., 2020)、地震(Inoue & Todo, 2019; Carvalho et al., 2021)、病害(Zurek et al., 2022)以及公共卫生事件(Hu et al., 2022; Wang et al., 2022)等。而在外生冲击的社会因素方面,更倾向于选取金融危机(Doran & Fingleton, 2018)、债务危机(Liu & Varotto, 2021)、贸易争端(Chen et al., 2022)、法律规制(Pichler et al., 2023)、地缘政治(Uddin et al., 2022)、政府保护(Grossman et al., 2023)等因素开展研究。同时,部分冲击并非一次性的,往往呈现动态的、持续性的特征, Jiang et al. (2022)、Cheng et al. (2022)将冲击划分为瞬时冲击与累积冲击,对韧性评估方法赋予动态特征。在产业链韧性研究中,两种冲击类型兼而有之,自然灾害与社会因素所造成外生的冲击皆能够影响企业正常的生产活动,对产业链原材料运输、技术创新研发、中间品流通等环节产生影响。值得注意的是,在百年未有之大变局的时代背景之下,原材料断供、技术封锁、贸易争端等社会性因素正成为影响产业链韧性的突出因素。

2. 冲击时点的识别

韧性体现了系统从冲击到恢复的过程观(Martin & Sunley, 2015),产业链韧性研究自不例外,而这一过程之始正在于冲击时点的识别。对于冲击时点的识别问题,一方面,研究者可以依据相关事实确定冲击时点;另一方面,研究者可以通过数据特征自定冲击时点。对于前者而言,可将现实中的原材料断供、中间产品断供、技术封锁等事件作为产业链冲击时点进行分析;对于后者而言,目前此类方法在产业链韧性研究中尚无具体应用,多见于宏观经济韧性的研究之中,但其冲击时点确定方法对于产业链韧性研究仍具有借鉴意义。Soufi et al. (2022)通过相邻两期时间序列数据的波动率设定冲击阈值算法,以此识别宏观经济指标变动趋势的转换时点。Di Tommaso et al. (2023)的识别方法略有不同,其通过观察时间序列的形态特征进行识别,将指标由顶点开始下跌的时点定为冲击点,由最低点开始上升的时点定为恢复点。冲击时点识别的重要性在于该过程同绩效曲线方法密切联系,绩效曲线方法是一种低维系统中利用连续积分或者离散化数值积分评价韧性水平的方法,其积分区间的下限正是冲击发生的时点,关于绩效曲线方法将在后文中进一步展开讨论。此外,目前有部分产业链供应链韧性研究并不依赖于现实世界中冲击发生与否,而是基于产业韧性动态系统或是生产网络特征进行模拟冲击,进而利用反事实分析法刻画产业链韧性水平(Kim et al., 2015; Xu et al., 2019; König et al., 2022),这些方法均具备一定的学科交叉特性,对产业链韧性测度具有一定的借鉴意义。

(二)结构分析

结构分析包括网络拓扑结构分析与系统动力分析,其目的在于厘清冲击传播的内部机制,大量的韧性理论前沿方法正聚焦于此。随着经济全球化与生产能力的快速提升,产业链逐步由单一链条发展为复杂的生产网络结构,从网络科学方法出发研究产业链的结构与韧性正成为新的发展方向,业已超出了传统经济学的分析范畴(Xu et al., 2011)。

1. 网络结构分析与应用

复杂网络科学起源于物理学研究,研究内容主要包括识别网络性质、建立网络模型、分析网络行为与设计网络性能等方面(Watts & Strogatz, 1998)。自网络科学兴起以来,关于网络结构的稳健性与脆弱性分析始终是该学科研究的重点之一,大量经典与前沿文献聚焦于此(Cohen et al., 2000; Callaway et al., 2000; Pasqualetti et al., 2020; Meena et al., 2023)。Albert et al. (2000)通过设定“随机故障”与“蓄意攻击”

两类冲击情景,客观比较了ER随机图与BA无标度网络连通性对于不同冲击的稳健性表现,证明了无标度网络度分布的极端非均匀性增强了其应对节点随机故障时的稳健性,而这一特点对于无标度网络应对蓄意攻击时的稳健性起到了负向效果,揭示了无标度网络模型的“阿喀琉斯之踵”(Achilles' heel)。

在网络分析的经济理论层面,McNerney et al.(2013)利用投入产出表数据与统计物理学方法构建与分析了48个经济体的生产网络结构,对网络的拓扑结构、流量规模分布、产业规模分布以及网络社区结构的基本性质进行了初步的探讨。Kim et al.(2015)基于分块对角(block-diagonal)、无标度(scale-free)、集中式(centralized)、对角式(diagonal)四种基本网络结构,探究了网络韧性同网络拓扑结构的相关关系。文章通过比较四种不同网络类型的拓扑特征后提出,节点度分布越接近幂律分布,网络结构越具备韧性。同时,在网络分析中,网络的耦合特征能够对网络系统的韧性与动力学行为产生重要作用,但是当前复杂网络科学中对其耦合特性常做出同质性假设,忽略了网络间耦合异质性特征的影响。Dong et al.(2021)提出了一个模块化交互网络模型,用以研究不同属性的子网络间的异质性耦合关系,试图寻找使得网络达到最优韧性水平的网络拓扑特征。文章利用Zephyr M&A数据库中企业级并购数据验证模型的有效性,从而为开放主义者与保护主义者在贸易开放过程中的“经济边界”争论提供合理的建议。Jiang et al.(2022)提出了一个由反应能力、抵抗能力、运转能力、恢复能力与演进能力组成的综合韧性理论框架,并且利用网络结构拓扑特征与动态贝叶斯网络方法(Dynamic Bayesian Network)测度韧性水平,同时利用仿真实验验证了该评价框架的有效性和通用性。在后续的发展中,网络分析方法不断突破学科边界,正逐步应用于产业链韧性问题之中。

在应用层面,已有多个学科尝试利用网络分析方法分析韧性问题。在交通网络研究方面,Xu & Zhang(2022)通过测算航运交通网络的度(degree)、互易性(reciprocity)、最大连通片(the largest connected component)等拓扑特征测度了交通网络韧性。在创新网络研究方面,Ma(2022)从宏观与微观角度考察了城市创新网络结构,将城市创新网络韧性区分为系统韧性与节点韧性,前者使用节点的度分布与度相关指数进行韧性测度,后者使用自组织能力、节点传递性、多样性指标进行测度。在生产网络与供应链网络研究方面,Xu et al.(2019)提出利用包含网络拓扑信息的多维非线性模型捕捉供应链网络的动态特征,同时基于Marklines数据库中的全球汽车产业供应链数据对其予以验证,文章发现网络的韧性水平对拓扑结构的变动高度敏感。Diem et al.(2022)基于匈牙利中央银行的增值税微观数据对生产网络进行建模,并基于此构建了企业层级的经济系统性风险测度方法。研究发现,匈牙利0.035%的公司具有极高的经济系统性风险,如果其中任何一家公司违约,将影响约23%的国民经济产出水平,这证明了企业规模并不能解释其个体风险的大小,而企业在生产网络节点中的重要程度却与此直接相关,再次验证了“颗粒假说”(Gabaix,2011)。

然而,只有极少数国家能够提供增值税微观数据,在更多的情形下,企业层级的供应链上下游关系需要通过间接推断得出。Reisch et al.(2022)利用移动电话运营商的电信数据对企业间关联信息予以识别,基于此推断真实的生产网络结构,并借鉴Diem et al.(2022)的风险量化方法对系统性风险进行系统估计,进而识别出对供应链韧性具有重要作用的关键节点企业。该方法是基于微观调查数据、税务数据或银行交易数据进行产业链、供应链研究的有效替代,使学者能够研究链条结构并实时监控经济系统性风险,为国家层面的生产网络提供了近似概览。Ialongo et al.(2022)利用荷兰银行商业客户的账户数据,基于统计物理学中的最大熵原理(principle of maximum entropy)构建了密度校正引力模型(density-corrected gravity model,dcGM)与条带校正引力模型(stripe-corrected gravity model,scGM),以此刻画企业级生产网络结构。相较于dcGM,scGM更能够刻画供应链中企业间的异质性关系,为风险冲击情境下的产业链供应链韧性研究提供了备选的建模方法。此外,鉴于机器学习方法在数据处理、降维与预测方面的强大能力,部分产业链供应链研究学者正尝试利用机器学习工具进行网络预测与重建(Kosasih & Brintrup,2022;Mungo et al.,2023)。Mungo et al.(2023)依据企业的财务、行业以及位置信息等维度的数据特征,利用机器学习方法对企业级生产网络展开预测。该方法主要关注链条节点之间是否存在连接,而非节点之间的交易数额,从而将网络重建工作

转化为标准的分类问题,进而利用集成算法便可以实现对链条的预测。基于 Compustat、FactSet 和厄瓜多尔公司级管理数据集的学习结果表明,该方法具有可靠的预测性能。Pichler et al.(2023)对于基于微观数据建立的生产网络(供应链网络)研究的时代背景、应用前景、数据安全以及备选方法进行了前瞻性论述,为产业链供应链的结构分析提供了新的参考。

2. 复杂系统结构分析与应用

近年来,将网络分析同复杂系统建模相结合的方法成为韧性研究新的突破点,促进了人们对拓扑结构与动态系统耦合关系的理解(Moutsinas & Guo, 2020)。在理论分析方面,Gao et al.(2016)注意到已有韧性模型缺乏对于系统结构及其内部元素相互作用的分析,进而提出基于多维复杂系统模型的结构分析方法与测度框架。Moutsinas & Gao(2020)在 Gao et al.(2016)的研究基础之上,提出了评估复杂网络系统中单个节点韧性的序贯平均场方法(sequential mean-field approach)。该方法克服了以往方法中对于微观节点韧性识别不足的缺点,将系统与节点的韧性函数作为扰动函数,对拓扑测度与动态系统进行数学建模,为复杂系统中脆弱节点的识别与风险预测提供了新的借鉴。然而,Moutsinas & Gao(2020)的韧性识别方法基于所有系统信息已知的关键假设,没有考虑不确定性对于系统和节点的影响。鉴于此,Zou et al.(2023)提出了基于任意多项式混沌(arbitrary polynomial chaos)方法评估单一节点韧性的理论模型。该韧性评价模型允许系统参数服从任意分布,克服了以往建模中不确定性缺失的问题,具有更广泛的应用场景。

就应用研究而言,众多研究通过复杂系统科学的方法,对宏观经济系统、供应链网络以及产业链网络等复杂系统进行解构与建模,继而通过动态模拟方法验证系统的韧性水平。在经济韧性方面,Duan et al.(2022)基于 Gao et al.(2016)的多维网络韧性框架,结合 Lotka-Volterra 方法构建复杂系统模型,以此分析产业网络拓扑结构、外商直接投资以及汇率波动对经济韧性的影响。在供应链韧性方面,Inoue & Todo(2019)使用动态主体建模(agent-based model, ABM)方法研究了供应链网络中的风险传递效应,证实了网络风险的间接效应远远小于直接效应。Larrea-Gallegos et al.(2022)同样提出使用 ABM 方法进行供应链网络的可持续性、韧性与复杂性研究。在产业链韧性方面,König et al.(2022)通过建立动态随机微分方程系统,刻画了生产网络中企业的进入退出动态与生存韧性特征,继而采用 FactSet Revere Business Relationships 数据库企业层级的生产关联数据,以及 Compustat Segments 和 Capital IQ 数据库的企业动态数据,对随机微分方程系统中的结构参数进行估计。基于产业链供应链回迁与中断情景的反事实分析结果表明,回迁政策限制供应关系,损害生产网络韧性,对产业链供应链安全造成负向影响,且这一影响随着生产网络的自适应性而扩大。Liu et al.(2023)基于地缘政治风险与新能源汽车需求激增的背景,对钴产业链供应链的韧性与安全问题予以探讨。该文构建了一个含有价格、产能、供给、需求四个子系统的复杂系统,并用仿真模拟方法对“回收技术”“库存”“原材料替代”三种强链方法的有效性进行了讨论。

由上述讨论不难发现,在学科交叉视域之下进行产业链韧性研究具有显著的优势。系统科学中的网络分析、复杂系统建模、系统动力传播等领域发展迅速,为产业链网络与系统的结构分析提供了科学的理论指导。目前,运用网络科学或复杂系统建模方法进行产业链韧性的研究尚处于探索阶段,依然存在较大的发展空间。

(三) 韧性评价

韧性评价包括评价维度与评价方法两部分,其中,评价维度涉及韧性水平的内涵界定与指标选取,而评价方法关乎具体的测度模型,如核心变量法、综合评价法与绩效曲线法等。相较于已有的产业链韧性评价方法,管理学、生态学以及城市规划等学科中的韧性评价方法更为丰富,测度方式也更为合理,对于产业链韧性评价具有重要的借鉴意义。

1. 基于运筹学方法的韧性评价

已有文献基于熵权法、TOPSIS、灰色关联分析、PageRank 等方法对于产业链韧性测度进行了有益的探讨,但这些方法作为综合评价理论中的基础方法,存在众多缺点与众多不足。随着运筹学方

法的不断发展,更新的多准则决策分析工具正逐步运用于韧性评价之中。

在城市韧性与经济韧性方面,Xun & Yuan(2020)提出使用混合多属性 TOPSIS 方法测度城市韧性,其原因在于该文认为城市韧性评价是一个包含清晰指标与模糊指标的混合多属性群体决策问题,涵盖生态环境、市政设施、经济发展与社会发展等多个维度,普通的 TOPSIS 方法难以评价其中的模糊指标。该文将直觉模糊集理论(theory of intuitionistic fuzzy set)同 TOPSIS 方法相结合,能够对于韧性框架中的模糊性指标进行合理测度。Wang et al.(2022)从抵抗力与恢复力角度出发,构建了包含经济绩效、社会凝聚力、公共卫生水平、政策支持和人口流动在内的五维城市韧性评价框架。文章以主观赋权与客观赋权相结合的方式,对层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)与熵权法所得权重进行组合优化,将所得组合权重运用到 TOPSIS 方法之中,以此评价城市韧性。Liu et al.(2023)将熵权法与耦合协调度模型(coupling harmonious degree model, CHDM)相结合,对中国沿海 20 个主要城市的经济韧性水平进行测度,进而分析了海洋经济质量与城市韧性水平的协调关系,为以往单一的区域韧性测度方式开辟了新的路径。

除了与 TOPSIS 相关的各种拓展方法外,多准则妥协解排序法(vlsekriterijumska optimizacija i kompromisno resenje, VIKOR)是另一种常用的多准则决策方法。相较于 TOPSIS 方法,VIKOR 方法考虑了决策者的主观偏好,其特点为将最大化的“群体效益”和最小化的“个体遗憾”相结合,从而使该方法研究多属性决策问题时更加合理(Opricovic & Tzeng, 2004)。Zhu et al.(2021)基于城市韧性视角对长江三角洲流域城市的洪水灾害管理水平予以评估,其韧性测度框架包括洪水灾害发生前的抵抗能力、洪水过程中的应对能力以及洪水过后的恢复与适应能力。在指标选取方面,该文提出了指标选取过程中需要遵循的四个原则:可接受、可调整、可测度、可获得。所谓“可接受”即指标选取需符合评估框架的内涵逻辑;“可调整”即指该指标具有可调整性,足以适应所有城市的情况;“可测度”指该指标能够被合理量化;“可获得”指数据的获取较为便捷。对于产业链韧性研究而言,这些日益更新的运筹学评价方法为产业链韧性评价提供了更多的方法选择,有助于从更加合理的维度优化韧性评价体系。

2. 基于绩效曲线法的韧性评价

绩效曲线法是韧性测度理论中的常见方法之一,该方法主要包括两部分:其一,选取代表性指标构建绩效曲线;其二,求解绩效曲线下方的绝对面积或相对面积以评价韧性水平。

在代表性指标的选取与构建部分,该方法常常与核心变量法、综合评价方法相联系。Soufi et al.(2022)构建了一个多维宏观经济韧性的量化框架,该框架选取了公共债务率、银行不良资产率、股票收益率、失业率、汇率等宏观经济指标作为测度经济韧性的核心变量。在测度方法上,该文首先利用核心变量方法测算出各个核心变量的相对变动比率,其次使用 DEA 方法将其组合为单一的经济绩效指标,最后利用绩效曲线法测算宏观经济的韧性损失水平。在求解绩效曲线积分的部分,不同的积分方法将产生不同的韧性含义。Li et al.(2017)系统比较了多种基于几何意义的韧性测度方法,其中包括韧性损失水平、韧性水平、标准化韧性水平、动态标准化韧性水平等。同时,该文提出了固定时间间隔的韧性测度方法,该方法的突出优点在于,当时间间隔固定之后,不同系统间得以横向比较,且更为重要的是该方法反映了系统在固定时间内的恢复能力。

在应用方面,Li & Zobel(2020)基于彭博供应链数据库(Bloomberg SPLC database)数据,利用仿真方法与回归分析刻画了供应链网络风险传播的“涟漪效应”。Ahmadian et al.(2020)为刻画系统的主动变革能力,提出了多阶段韧性测度框架,即该方法假设冲击发生之后系统会选择合适的替代性方案以减小总体的损失水平。当绩效水平恢复到一定程度之后,替代方案将劣于原有方案,故系统将重新回到原有路径,从而使得系统韧性测度呈现阶段特征。绩效曲线韧性评价法同样可运用于金融韧性测度之中,Tang et al.(2022)运用 TVP-VAR 模型导出脉冲响应函数,以此捕捉金融市场应对外生冲击的时变特征。该文关键之处在于其基于绩效曲线的韧性测度思想,运用脉冲响应函数构建出风险吸收强度与速度两维指标,以此作为金融市场的韧性测度,合理反映出金融市场面临资本市场冲击之时的抵御能力与恢复效率。

绩效曲线韧性评价方法作为韧性评价理论的经典方法具有多重优点,适用多种评价环境。其一,该评价体系较为成熟,应用十分广泛。在实际测度过程中,该方法能够客观展现韧性的时变特征,区分韧性的抵抗能力、恢复能力,对瞬时韧性与累积韧性能够做出具有解释力的评价。其二,该评价方法具有良好的兼容与嫁接能力,适用于产业链韧性评价。产业链韧性的绩效表现水平可以采用诸如综合评价法、核心变量法等多种方法进行测度,从而将单一韧性测度方法向组合韧性测度方法进行拓展。然而,该方法依旧存在两大问题:一方面,如何合理有效地衡量产业链韧性的绩效表现水平?尽管这一问题对于产业链韧性评价具有重要意义,但是目前文献中缺乏对于该问题的探讨。另一方面,绩效曲线法仍然属于低维韧性建模方法,相较于网络分析与复杂系统建模方法,该方法对于微观节点韧性水平的刻画仍有所欠缺。

五、简评与展望

产业链韧性研究作为产业经济学的新兴话题存在众多困难与挑战。首先,可靠且完备的产业链数据是科学测度产业链韧性的前提条件。然而,在实际的产业链研究之中,产业链数据缺失与数据低质已然成为研究的重要阻碍。其次,需要明确定位产业链韧性研究的适用场景。相较于传统的产业经济学问题,产业链韧性研究的核心差异在于其前提是外部冲击的存在,而并非所有行业的产业链都具有冲击场景。对于某些新兴产业、高科技行业,往往由过去重大的冲击催生而来,存续期内经历的外生冲击较少,这对韧性识别提出了一定的挑战。再次,因技术水平、资源储备、产权结构、市场习惯、地缘政治等多重因素,不同产业在发展过程中呈现出不同特征,韧性水平波动的现实内涵也不尽相同。因此,如何在众多行业分类中识别重点产业链、供应链成为一个关键的科学问题。最后,产业链之间面临的冲击既有共生性的,也有特定性的,甚至存在同一产业链同时面临多种冲击的情形。如何清晰识别冲击的时点、区分冲击的类型正成为产业链韧性研究的关键任务。

目前国内关于产业链韧性问题的研究仍然处于起步阶段,但国外关于韧性理论的成果较为丰富,供应链韧性理论已成体系,故未来研究可在以下几个方面进行拓展:第一,探讨韧性理论的学科交叉。产业链韧性理论研究应密切关注复杂系统科学、数据科学等相关学科韧性理论的研究进展。一方面,产业链韧性理论的内涵不断丰富,经历了从一维的恢复能力、抵抗能力向多维的适应能力、变革能力的演进过程,这些含义已经超出了传统的产业组织理论的研究范畴,亟须开发新的规范化研究方法。另一方面,社会科学的研究方法正处于自模型驱动向数据驱动的变革之中,无论是宏观的全产业链图谱还是微观的特定行业产业链,都涉及大量的微观数据,而网络科学、数据科学等学科提供了诸多大数据识别、处理与分析的方法和工具。第二,夯实产业链韧性的学理基础。学理基础薄弱是产业链韧性理论研究的一大难题,尽管国内外已有大量的学者对产业链问题进行了理论探讨与实证研究,但是鲜有学者能够建立起完整的产业链韧性分析框架。同时,就韧性理论而言,其内涵丰富多样,且在不同的学科中存在较大的差距,诸多理论概念存在歧义,研究方法也不尽相同。就测度方法而言,这些经典与前沿文献中的韧性测度方法具有科学性,但在某些特殊情形下又存在一定的局限性。Martin & Sunley(2015)指出,社会和经济系统与生态和物理系统有着根本的不同,不能照搬后者的韧性概念。上述分析表明,构建产业链韧性理论框架不能仅仅对已有韧性理论的简单迁移,更需要深耕于产业组织理论,厚植于中国经济实践,同构建新发展格局相协调,同筑牢国家总体安全观相适应,以此为增强产业链韧性与提高安全水平提供理论支撑与测度方法。

参考文献:

- Acemoglu, D. et al.(2012), "The network origins of aggregate fluctuations", *Econometrica*, 80(5):1977—2016.
- Ahmadian, N. et al.(2020), "A quantitative approach for assessment and improvement of network resilience", *Reliability Engineering & System Safety*, 200, No.106977.
- Albert, R. et al.(2000), "Error and attack tolerance of complex networks", *Nature*, 406(6794):378—382.
- Anguelovski, I. et al.(2016), "Equity impacts of urban land use planning for climate adaptation: Critical perspectives

- from the global North and South”, *Journal of Planning Education and Research*, 36(3):333—348.
- Asadzadeh, A. et al.(2022), “Urbanization, migration, and the challenges of resilience thinking in urban planning: Insights from two contrasting planning systems in Germany and Iran”, *Cities*, 125, No.103642.
- Baltagi, B.H. et al.(2014), “Estimating and forecasting with a dynamic spatial panel data model”, *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 76(1):112—138.
- Bănică, A. et al.(2020), “Natural disasters as a development opportunity: A spatial economic resilience interpretation”, *Review of Regional Research*, 40(1):223—249.
- Barrett, C. et al.(2021), “A scoping review of the development resilience literature: Theory, methods and evidence”, *World Development*, 146, No.105612.
- Behrens, K. et al.(2020), “Are clusters resilient? Evidence from Canadian textile industries”, *Journal of Economic Geography*, 20(1):1—36.
- Bolson, N. et al.(2022), “Resilience rankings and trajectories of world’s countries”, *Ecological Economics*, 195, No.107383.
- Briguglio, L. et al.(2009), “Economic vulnerability and resilience: Concepts and measurements”, *Oxford Development Studies*, 37(3):229—247.
- Callaway, D.S. et al.(2000), “Network robustness and fragility: Percolation on random graphs”, *Physical Review Letters*, 85(25):5468—5471.
- Carter, C.R. et al.(2015), “Toward the theory of the supply chain”, *Journal of Supply Chain Management*, 51(2):89—97.
- Carvalho, V.M. et al.(2021), “Supply chain disruptions: Evidence from the Great East Japan Earthquake”, *Quarterly Journal of Economics*, 136(2):1255—1321.
- Chen, H. et al.(2022), “The reshoring decision under uncertainty in the post-COVID-19 era”, *Journal of Business & Industrial Marketing*, 37(10):2064—2074.
- Cheng, Y. et al.(2022), “Systems resilience assessments: A review, framework and metrics”, *International Journal of Production Research*, 60(2):595—622.
- Christensen, J.F.(2011), “Industrial evolution through complementary convergence: The case of IT security”, *Industrial and Corporate Change*, 20(1):57—89.
- Cohen, R. et al.(2000), “Resilience of the internet to random breakdowns”, *Physical Review Letters*, 85(21):4626—4628.
- Davies, S.(2011), “Regional resilience in the 2008—2010 downturn: Comparative evidence from European countries”, *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 4(3):369—382.
- Dhyne, E. et al.(2021), “Trade and domestic production networks”, *Review of Economic Studies*, 88(2):643—668.
- Di Tommaso, M.R. et al.(2023), “Conceptualizing and measuring ‘industry resilience’: Composite indicators for post shock industrial policy decision-making”, *Socio-Economic Planning Sciences*, 85, No.101448.
- Diem, C. et al.(2022), “Quantifying firm-level economic systemic risk from nation-wide supply networks”, *Scientific Reports*, 12(1), No.7719.
- Diodato, D. & A.B.Weterings(2015), “The resilience of regional labour markets to economic shocks: Exploring the role of interactions among firms and workers”, *Journal of Economic Geography*, 15(4):723—742.
- Dong, G. et al.(2021), “Optimal resilience of modular interacting networks”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(22), e1922831118.
- Doran, J. & B.Fingleton(2018), “US metropolitan area resilience: Insights from dynamic spatial panel estimation”, *Environment and Planning A: Economy and Space*, 50(1):111—132.
- Duan, W. et al.(2022), “Industrial structure conditions economic resilience”, *Technological Forecasting and Social Change*, 183, No.121944.
- Farber, S.(1995), “Economic resilience and economic policy”, *Ecological Economics*, 15(2):105—107.
- Gabaix, X.(2011), “The granular origins of aggregate fluctuations”, *Econometrica*, 79(3):733—772.
- Galbusera, L. & G. Giannopoulos (2018), “On input-output economic models in disaster impact assessment”, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 30(2):186—198.
- Gao, J. et al.(2016), “Universal resilience patterns in complex networks”, *Nature*, 530(7590):307—312.
- Gereffi, G.(1994), “The organization of buyer-driven global commodity chains: How U.S. retailers shape overseas

- production networks”, in: G.Gereffi & M.Korzeniewicz(eds.), *Commodity Chains and Global Capitalism*, Praeger.
- Giannakis, E. & A.Bruggeman(2017), “Economic crisis and regional resilience: Evidence from Greece”, *Papers in Regional Science*, 96(3):451–476.
- Giannakis, E. & T.P.Mamuneas(2022), “Labour productivity and regional labour markets resilience in Europe”, *Annals of Regional Science*, 68(3):691–712.
- Gnutzmann, H. et al.(2020), “Market structure and resilience: Evidence from Potash mine disasters”, *American Journal of Agricultural Economics*, 102(3):911–933.
- Gong, H. et al.(2022), “Strategic coupling and institutional innovation in times of upheavals: The industrial chain chief model in Zhejiang, China”, *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 15(2):279–303.
- Grafton, R.Q. et al.(2019), “Realizing resilience for decision-making”, *Nature Sustainability*, 2(10): 907–913.
- Grossman, G. M. et al. (2023), “Supply chain resilience: Should policy promote international diversification or reshoring?”, *Journal of Political Economy*, 131(12):3267–3540.
- Han, Y. & S.J.Goetz(2019), “Predicting US county economic resilience from industry input-output accounts”, *Applied Economics*, 51(19):2019–2028.
- He, C. et al.(2021), “Do not put eggs in one basket: Related variety and export resilience in the post-crisis era”, *Industrial and Corporate Change*, 30(6):1655–1676.
- He, P. et al.(2017), “Energy-economic recovery resilience with input-output linear programming models”, *Energy Economics*, 68(1):177–191.
- He, P. et al.(2019), “Energy-economic resilience with multi-region input-output linear programming models”, *Energy Economics*, 84, No.104569.
- Hu, X. et al.(2022), “What matters for regional economic resilience amid COVID-19? Evidence from cities in Northeast China”, *Cities*, 120, No.103440.
- Hu, X. & L.Zhang(2023), “Research on the integration level measurement and optimization path of industrial chain, innovation chain and service chain”, *Journal of Innovation & Knowledge*, 8(3), No.100368.
- Huang, H. et al.(2023), “Concepts, models, and indicator systems for urban safety resilience: A literature review and an exploration in China”, *Journal of Safety Science and Resilience*, 4(1):30–42.
- Huang, J.K.et al.(2017), “The prospects for China’s food security and imports: Will China starve the world via imports?”, *Journal of Integrative Agriculture*, 16(12):2933–2944.
- Hwang, C.L. et al. (1993), “A new approach for multiple objective decision making”, *Computers and Operational Research*, 20(8):889–899.
- Hynes, W. et al.(2022), “Systemic resilience in economics”, *Nature Physics*, 18(4):381–384.
- Ialongo, L.N. et al.(2022), “Reconstructing firm-level interactions in the Dutch input-output network from production constraints”, *Scientific Reports*, 12(1), No.11847.
- Inoue, H. & Y. Todo (2019), “Firm-level propagation of shocks through supply-chain networks”, *Nature Sustainability*, 2(9):841–847.
- Jiang, F. et al.(2023), “Geographic dispersion and corporate resilience during the COVID-19 pandemic”, *International Review of Financial Analysis*, 88(1), No.102684.
- Jiang, S. et al.(2022), “A quantitative framework for network resilience evaluation using dynamic Bayesian network”, *Computer Communications*, 194(1):387–398.
- Khanna, G. et al.(2022), “Supply chain resilience: Evidence from Indian firms”, NBER Working Paper, No. 30689.
- Kim, Y. et al. (2015), “Supply network disruption and resilience: A network structural perspective”, *Journal of Operations Management*, 33(1):43–59.
- Klimek, P. et al.(2015), “Systemic trade risk of critical resources”, *Science Advances*, 1(10), e1500522.
- Klimek, P. et al. (2019), “Quantifying economic resilience from input-output susceptibility to improve predictions of economic growth and recovery”, *Nature Communications*, 10(1), No.1677.
- Kosasih, E.E. & A.Brintrup(2022), “A machine learning approach for predicting hidden links in supply chain with graph neural networks”, *International Journal of Production Research*, 60(17):5380–5393.
- König, M.D. et al. (2022), “Aggregate fluctuations in adaptive production networks”, *Proceedings of the National*

- Academy of Sciences*, 119(38), e2203730119.
- Larrea-Gallegos, G. et al.(2022), “Sustainability, resilience and complexity in supply networks: A literature review and a proposal for an integrated agent-based approach”, *Sustainable Production and Consumption*, 30(1):946–961.
- Lagravinese, R. (2015), “Economic crisis and rising gaps North-South: Evidence from the Italian regions”, *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 8(2):331–342.
- Li, R. et al.(2017), “A new resilience measure for supply chain networks”, *Sustainability*, 9(1), No.144.
- Li, Y. & C. W. Zobel (2020), “Exploring supply chain network resilience in the presence of the ripple effect”, *International Journal of Production Economics*, 228, No.107693.
- Lin, B. & Y. Teng (2022), “Decoupling of economic and carbon emission linkages: Evidence from manufacturing industry chains”, *Journal of Environmental Management*, 322, No.116081.
- Lin, B. & Y. Teng (2023), “The effect of industrial synergy and division on energy intensity: From the perspective of industrial chain”, *Energy*, 283, No.128487.
- Liu, C. & S. Varotto (2021), “Is small beautiful? The resilience of small banks during the European debt crisis”, *International Review of Financial Analysis*, 76, No.101793.
- Liu, W. et al.(2023), “Resilience assessment of the cobalt supply chain in China under the impact of electric vehicles and geopolitical supply risks”, *Resources Policy*, 80, No.103183.
- Liu, Y. et al.(2023), “Evolution of the coupling coordination between the marine economy and urban resilience of major coastal cities in China”, *Marine Policy*, 148, No.105456.
- Ma, H. et al.(2022), “Towards innovation resilience through urban networks of co-invention: A case study of cities in China”, *Frontiers in Earth Science*, 10, No.974219.
- Martin, R. & P. Sunley (2015), “On the notion of regional economic resilience: Conceptualization and explanation”, *Journal of Economic Geography*, 15(1):1–42.
- Martin, R. & P. Sunley (2020), “Regional economic resilience: Evolution and evaluation”, in: G. Bristow & A. Healy (eds.), *Handbook on Regional Economic Resilience*, Edward Elgar.
- Martin, R. (2012), “Regional economic resilience, hysteresis and recessionary shocks”, *Journal of Economic Geography*, 12(1):1–32.
- Martin, R. et al. (2016), “How regions react to recessions: Resilience and the role of economic structure”, *Regional Studies*, 50(4):561–585.
- McCarthy, I. P. et al. (2017), “Adaptive organizational resilience: An evolutionary perspective”, *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 28(1):33–40.
- McNerney, J. et al. (2013), “Network structure of inter-industry flows”, *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 392(24):6427–6441.
- McNerney, J. et al. (2022), “How production networks amplify economic growth”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(1), e2106031118.
- Meena, C. et al. (2023), “Emergent stability in complex network dynamics”, *Nature Physics*, 19(7):1033–1042.
- Meyer, K. et al. (2018), “Quantifying resilience to recurrent ecosystem disturbances using flow-kick dynamics”, *Nature Sustainability*, 1(11):671–678.
- Moutsinas, G. & W. Guo (2020), “Node-level resilience loss in dynamic complex networks”, *Scientific Reports*, 10(1), No.3599.
- Mungo, L. et al. (2023), “Reconstructing production networks using machine learning”, *Journal of Economic Dynamics and Control*, 148(1), No.104607.
- Nassar, N. T. et al. (2020), “Evaluating the mineral commodity supply risk of the US manufacturing sector”, *Science Advances*, 6(8):1–11.
- Oliver, R. K. & M. D. Webber (1982), “Supply chain management: Logistics catches up with strategy”, in: M. Christopher (ed.), *Logistics: The Strategic Issues*, Chapman and Hall.
- Olsson, L. et al. (2015), “Why resilience is unappealing to social science: Theoretical and empirical investigations of the scientific use of resilience”, *Science Advances*, 1(4), e1400217.
- Oprićovic, S. & G. H. Tzeng (2004), “Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS”, *European Journal of Operational Research*, 156(2): 445–455.

- Pasqualetti, F. et al.(2020), “Fragility limits performance in complex networks”, *Scientific Reports*, 10(1), No.1774.
- Pendall, R. et al.(2010), “Resilience and regions: Building understanding of the metaphor”, *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 3(1):71–84.
- Pichler, A. et al.(2023), “Building an alliance to map global supply networks”, *Science*, 382(6668):270–272.
- Porter, M.E.(1985), *The Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance*, Free Press.
- Reisch, T. et al.(2022), “Monitoring supply networks from mobile phone data for estimating the systemic risk of an economy”, *Scientific Reports*, 12(1), No.13347.
- Rose, A.(2007), “Economic resilience to natural and man-made disasters: Multidisciplinary origins and contextual dimensions”, *Environmental Hazards*, 7(4):383–398.
- Rose, A. & E.Krausmann(2013), “An economic framework for the development of a resilience index for business recovery”, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 5(1):73–83.
- Simmie, J. & R.Martin(2010), “The economic resilience of regions: Towards an evolutionary approach”, *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 3(1):27–43.
- Smith, A.(2015), “Economic (in)security and global value chains: The dynamics of industrial and trade integration in the Euro-Mediterranean macro-region”, *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 8(3):439–458.
- Soufi, H.R. et al.(2022), “A quantitative approach for analysis of macroeconomic resilience due to socio-economic shocks”, *Socio-Economic Planning Sciences*, 79, No.101101.
- Sutton, J. & G.Arku(2022), “Regional economic resilience: Towards a system approach”, *Regional Studies, Regional Science*, 9(1):497–512.
- Tan, J. et al.(2020), “Industrial structure or agency: What affects regional economic resilience? Evidence from resource-based cities in China”, *Cities*, 106, No.102906.
- Tang, C. et al.(2022), “Financial market resilience and financial development: A global perspective”, *Journal of International Financial Markets, Institutions and Money*, 80, No.101650.
- Uddin, M. et al.(2022), “The resilience of the British and European goods industry: Challenge of Brexit”, *Industrial and Corporate Change*, 31(4):934–954.
- Upton, J. et al.(2022), “Caveat utilitor: A comparative assessment of resilience measurement approaches”, *Journal of Development Economics*, 157, No.102873.
- van der Kruk, E. et al.(2021), “Age-related compensation: Neuromusculoskeletal capacity, reserve & movement objectives”, *Journal of Biomechanics*, 122, No.110385.
- Wang, X. et al.(2022), “The spatiotemporal evolution of COVID-19 in China and its impact on urban economic resilience”, *China Economic Review*, 74, No.101806.
- Watts, D.J. & S.H.Strogatz(1998), “Collective dynamics of ‘small-world’ networks”, *Nature*, 393(6684):440–442.
- Xu, G. & X.Zhang(2022), “Statistical analysis of resilience in an air transport network”, *Frontiers in Physics*, 10, No.969311.
- Xu, M. et al.(2011), “Interconnectedness and resilience of the US economy”, *Advances in Complex Systems*, 14(5):649–672.
- Xu, M. et al.(2019), “Resiliency of mutualistic supplier-manufacturer networks”, *Scientific Reports*, 9(1):1–10.
- Xun, X. & Y.Yuan(2020), “Research on the urban resilience evaluation with hybrid multiple attribute TOPSIS method: An example in China”, *Natural Hazards*, 103(1):557–577.
- Zhu, S. et al.(2021), “Enhancing urban flood resilience: A holistic framework incorporating historic worst flood to Yangtze River Delta, China”, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 61, No.102355.
- Yu, B. & L.Chen(2023), “Bibliometric analysis of research literature on industrial chain resilience”, *Information and Knowledge Management*, 4(3):40–50.
- Zou, M. et al.(2023), “Uncertainty quantification of multi-scale resilience in networked systems with nonlinear dynamics using arbitrary polynomial chaos”, *Scientific Reports*, 13(1), No.488.
- Zurek, M. et al.(2022), “Food system resilience: Concepts, issues, and challenges”, *Annual Review of Environment and Resources*, 47(1):511–534.

Research Progress on Measurement Methods of Industrial Chain Resilience

XIAO Xingzhi, WANG Zhenyu and LI Shaolin

(Dongbei University of Finance and Economics, Dalian, China)

Summary: Industrial chain resilience measurement serves as a crucial starting point for identifying risks associated with chain disruption and ensuring the safety and stability of industrial chains. This topic has gained prominence in light of the pressing need to address and navigate significant changes in the new era. However, current research on industrial chain resilience faces challenges. This paper takes an interdisciplinary approach to analyze the practical requirements of measuring industrial chain resilience. Drawing from classic and cutting-edge literature, it discusses this endeavor's theoretical foundations, methodological approaches, and application steps, and proposes future research directions.

To begin with, this paper examines the theoretical underpinnings and evolutionary trajectory of both industrial chain and resilience theory, culminating in the concept of industrial chain resilience. Within the realm of social and economic activities, the interconnected structure of industrial sectors forms what we understand as the industrial chain, encompassing product production, commodity circulation, and value addition. As a dynamic process, industrial chain resilience encompasses four dimensions: resistance, recovery, adaptability, and transformative capabilities. Compared to economic resilience, its distinctiveness lies in its micro perspective, emphasis on “compensation”, and network characteristics.

Subsequently, this paper reviews cutting-edge advancements and critical challenges in methods for measuring industrial chain resilience, focusing on the core variable method, the comprehensive evaluation method, and the input-output method. The core variable method captures resilience's dynamic nature by selecting a representative variable, offering flexibility and operability. However, its limitation lies in its single-dimensional representation and the need for carefully considering counterfactual measurements. The comprehensive evaluation method employs multi-criteria decision analysis tools to assess complex decision-making issues, reflecting rich economic connotations. Nevertheless, challenges include insufficient authority in indicator selection, ambiguity in weighting algorithms and indicator systems, and the lack of impact connotation on the industrial chain. Based on the modeling analysis, the input-output method accurately quantifies chain correlations but falls short in describing the impact process of disequilibrium and lacks granularity in enterprise-level analyses.

Further, from an interdisciplinary perspective, this paper comprehensively elucidates the application of resilience measurement theories and methods within the framework of “shock identification-structural analysis-resilience evaluation”. Shock identification, as the first step, involves categorizing shock types and pinpointing their timing. Structural analysis, the subsequent step, encompasses network topology analysis and system dynamics analysis. Network topology analysis involves identifying network properties, establishing models, analyzing behavior, and designing performance. Resilience evaluation, the final step, addresses evaluation dimensions and methods.

Finally, this paper outlines outstanding challenges in industrial chain resilience research and proposes future research directions. Challenges include the scarcity and quality of industrial chain data, the applicability of resilience scenarios, the identification of key industrial chains, and the timing and categorization of shocks. Future research should consolidate the academic foundation of industrial chain resilience while exploring interdisciplinary intersections with resilience theories, leveraging research methods from network science, machine learning, and complex systems science.

Keywords: Industrial Chain Resilience; Economic Resilience; Measurement Methods

JEL Classification: C10, L23, O25

(责任编辑:木子)

(校对:何伟)